

УДК 621.316

Определение объемов полезной и избыточной рекуперативной энергии электроподвижного состава городского электротранспорта

А. В. Кацай¹, В. А. Шаряков², О. Л. Шарякова³

¹ ООО «Кинемак», Россия, 115088, Москва, Южнопортовая ул., д. 40, стр. 3

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

³ Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна (ВШТЭ СПбГУПТД), Россия, 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4

Для цитирования: Кацай А. В., Шаряков В. А., Шарякова О. Л. Определение объемов полезной и избыточной рекуперативной энергии электроподвижного состава городского электротранспорта // Бюллетень результатов научных исследований. СПб.: ПГУПС. 2024. — Вып. 1. — С. 74–83. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-74-83

Аннотация

Цель: рассмотреть вопрос о необходимости точно определять полный объем энергии, которую подвижной состав вырабатывает в ходе преобразования механической энергии торможения в электрическую. Показать необходимость формирования мероприятий по увеличению объемов полезной рекуперации. **Методы:** использование известных аналитических выражений и результатов заездов, полученных при эксплуатации электрического подвижного состава городского электротранспорта на маршрутах. **Результаты:** показано, что предложенная методика определения объемов полезной и избыточной рекуперативной энергии позволяет точно определить баланс энергии в контактной сети городского электротранспорта. **Практическая значимость:** показано, что объемы полезной и избыточной энергии рекуперации в значительной степени зависят от сезонных изменений мощности и продолжительности нетяговой нагрузки в контактной сети и, следовательно, от погодных условий во время работы на маршруте. Данные об объемах полезной и избыточной рекуперации создают возможность для энергетических служб транспортных предприятий вырабатывать мероприятия по экономии энергии.

Ключевые слова: контактная сеть, электроподвижной состав, городской электротранспорт, рекуперативное торможение, полезная рекуперация, избыточная рекуперация, тяговый привод.

В ходе выполнения транспортной работы электроподвижной состав (ЭПС) городского электротранспорта (ГЭТ) потребляет из контактной сети (КС) электрическую энергию на совершение полезной работы по перемещению подвижной единицы (ПЕ). При электрическом торможении тяговый электрический привод может рекуперировать (преобразовывать) механическую энергию линейного движения ПЕ в электрическую энергию и выдавать ее в КС [4]. Если в КС имеется нагрузка, то рекуперативная энергия утилизируется полезно (полезная энергия рекуперации — $E_{\text{рекПолезн}}$) на систему тяги других вагонов или на потребление нетяговых устройств (отопление, освещение, компрессор и др.). В случае если в КС отсутствует нагрузка, сопоставимая по мощности с мощностью рекуперации, то энергия рекуперации направляется на тормозной резистор тормозящего вагона. Такая энергия рекуперации называется избыточной ($E_{\text{рекИзбыт}}$). Полная энергия рекуперации вагона определяется как сумма полезной и избыточной рекуперации (1):

$$E_{\text{Рек}} = E_{\text{РекПолезн}} + E_{\text{РекИзбыт}}. \quad (1)$$

Полное потребление энергии на выполнение транспортной работы в системе энергоснабжения предприятия ГЭТ обеспечивается двумя источниками энергии — тяговой подстанцией, которая является первичным источником питания ($E_{\text{ТП}}$) и полезно рекуперирующими при торможении вагонами, которые являются вторичными источниками питания в КС ($E_{\text{РекПолезн}}$).

С учетом двух типов источников энергии уравнение баланса энергии в КС ГЭТ записывается следующим образом:

$$E_{\text{ТП}} + E_{\text{РекПолезн}} = E_{\text{Тяги}} + E_{\text{СН}}, \quad (2)$$

где $E_{\text{Тяги}}$ — энергия, потребляемая тяговыми приводами ЭПС; $E_{\text{СН}}$ — энергия, потребляемая нетяговыми системами ЭПС, а также стационарными потребителями, присоединенными к КС.

Так как затраты предприятия на энергоресурсы формируются только показателем $E_{\text{ТП}}$, который определяется счетчиком тяговой подстанции (в данном случае мы рассматриваем так называемый котловый метод определения затрат на электроэнергию), то задачей ГЭТ в части снижения затрат на закупку энергии является увеличение объемов и доли $E_{\text{РекПолезн}}$, а также снижение $E_{\text{Тяги}}$ и $E_{\text{СН}}$ при достижении поставленных задач по количеству и качеству пассажироперевозок (то есть выполнения объемов транспортной работы). Причем повышение доли и объемов полезной рекуперации является наиболее эффективной мерой для повышения энергоэффективности ГЭТ. Для разработки соответствующих мероприятий требуется иметь данные по полному объему энергии рекуперации за длительные периоды наблюдения.

Существует несколько способов определения объемов энергии рекуперации в системе энергоснабжения ГЭТ. Базовые основы этих методик схожи с таковыми для расчета рекуперации в контактной сети РЖД [6], однако в системе энергоснабжения ГЭТ имеются существенные отличия от энергоснабжения РЖД, что накладывает ряд ограничений на применение в ГЭТ железнодорожной классификации методов оценки рекуперации без учета специфики городского наземного электротранспорта.

Наиболее простой способ — аналитический. Он может быть реализован, например, если ранее транспортное предприятие было оснащено ЭПС с резисторно-контакторными системами управления тяговыми двигателями, не использующими рекуперативное торможение, а после внедрения современного ЭПС, использующего транзисторные системы тягового привода, такую возможность получило. При этом вагоны не оснащены средствами учета обратной (рекуперированной) энергии, выдаваемой в КС. В таком случае при соблюдении приблизительно одинаковых

основных параметров транспортной работы (пробег вагонов за год, близкие погодные условия в рассматриваемые годы с разным подвижным составом), можно по данным внешних счетчиков тяговых подстанций сравнить эффект внедрения тяговых приводов, позволяющих выдавать в КС полезную рекуперацию. Недостатком такого подхода является то, что по показателям потребления энергии тяговой подстанции невозможно выделить, какой объем сетевой энергии потребляется на тягу и на нетяговые нужды. Большую неопределенность в аналитические результаты вносят несовпадение объемов транспортной работы за сравниваемые периоды, отличие погодных условий и другие факторы. Также таким способом невозможно определить объем энергии избыточной рекуперации.

Другим способом является учет энергии полезной рекуперации при помощи двунаправленных бортовых счетчиков энергии постоянного тока. Как правило, такие счетчики устанавливаются сразу после токоприемника. Значение прямой энергии является суммой потребления энергии на тягу и нетяговые нужды вагонов. Значение обратной энергии считают показателем полезной рекуперации. Однако это значение не является точным показателем объема полезной рекуперации, так как часть ее расходуется во внутренней сети вагона, то есть счетчиком не учитывается та часть полезной рекуперации, которая потребляется на собственные нужды вагона и на эту величину уменьшает показатель фиксируемой счетчиком полезной рекуперации. Также таким способом невозможно определить объем избыточной энергии рекуперации.

Еще один способ позволяет определять объем избыточной энергии рекуперации. Он состоит в применении бортовых или стационарных буферных накопителей энергии, которые запасают только эту избыточную рекуперацию [3]. Такие накопители энергии должны быть оборудованы счетчиками входной энергии. Однако данный способ не позволяет фиксировать потребление энергии на тягу вагонов, на собственные нужды и объемы полезной рекуперации.

Наиболее информативным для целей построения полного баланса энергии контактной сети ГЭТ является способ прямого замера потребления подвижным составом энергии на тягу, а также объемов полезной и избыточной рекуперации. Отметим, что в работе [6] о классификации методов для определения объемов рекуперации в КС ЖД отсутствует метод прямого измерения объемов избыточной энергии рекуперации и не говорится о важности нетягового энергопотребления для формирования баланса энергии в сети.

Возможность прямого замера тягового энергопотребления и разных видов рекуперации обеспечивают современные тяговые преобразователи, устанавливаемые на подвижной состав ГЭТ, позволяющие измерять потребление энергии на тягу, а также полезной и избыточной рекуперации и архивации этих значений в энергонезависимую память. Если все вагоны предприятия ГЭТ оснащены такими устройствами, то имеется реальная возможность ежедневного снятия этих

показателей, а также пробега вагонов. На основании архива таких данных баланс энергии КС ГЭТ рассчитывается достаточно просто.

На сегодняшний день в России имеется одно транспортное предприятие, ЭПС которого оснащен подобными устройствами и где производится ежедневный тотальный учет потребления энергии на тягу и полезной рекуперации вагонов (однако отсутствует возможность учета избыточной рекуперации) — концессионная транспортная система трамвая «Чижик» в Санкт-Петербурге. Также на ряде предприятий ГЭТ используются комбинации вышеперечисленных методов формирования баланса энергии в КС.

Поскольку процессы перетоков энергии в КС ГЭТ определяются количеством потребителей, координатной конфигурацией их в сети и суммарной мгновенной мощностью их нагрузки и рекуперации, которые на изолированных участках тяговой подстанции являются случайными, то, как выше было сказано, для определения объемов рекуперативной энергии наиболее подходящим является метод прямого измерения этой энергии бортовым регистрирующим устройством. Так как для таких измерений энергопотребление собственными нуждами ПЕ, которая не рекуперирует потребленную энергию, не представляет интереса, то наиболее показательным является измерение в точке питания тягового преобразователя. Измеряется прямой и обратный (рекуперативный) ток (в том числе полезный и избыточный — направляемый на тормозные резисторы), а также напряжение в КС и на звене постоянного тока инвертора. Результаты измерений фиксируются в энергонезависимой памяти и затем сгружаются на ПК оператора (табл. 1).

Измерения проводились на борту трамвайного вагона. Период регистрации — с 13:17:51 до 14:52:40, то есть в течение более полутора часов в межпиковое дневное время движения. Температура воздуха в этот день была +13 °С, без осадков, то есть системы отопления в вагонах на линии не работали, потребление собственными нуждами вагона из КС было незначительным. По маршруту движения испытательного вагона другими вагонами осуществлялась стандартная перевозочная деятельность. Фиксировались данные только одного из двух тяговых преобразователей, управляющих одинаковыми тяговыми электродвигателями вагонных тележек (рис. 1).

За время измерений одна тележка вагона потребила на тягу 13,37 кВт·ч электроэнергии (часть времени вагон провел на отстое на разворотном кольце). При этом суммарный объем полезной и избыточной рекуперации составил 6,79 кВт·ч, или 50,8% от объема потребления энергии на тягу. Другими словами, половина энергии, потребленной на тягу ЭПС, может быть возвращена на выполнение полезной работы. Часть этой энергии (две трети) в данный погодный сезон полезно утилизируется благодаря удачному совпадению одновременности наличия мощности нагрузки в сети на участках данной ТП и мощности рекуперации тормозящего вагона. Оставшаяся часть энергии рекуперации рассеивается на тормозных резисторах.

ТАБЛИЦА 1. Фрагмент записи в таблицу данных измерений

№	Время	I_{KC} , А	I_{PT} , А	U_{DC} , В	U_{KC} , В	V , км/ч
2021	13:26:02.720	5,00	0,00	682,00	637,00	0,00
2022	13:26:02.971	6,00	0,00	664,00	631,00	0,00
2023	13:26:03.223	7,00	0,00	661,00	637,00	0,00
2024	13:26:03.475	6,00	0,00	660,00	637,00	0,00
2025	13:26:03.725	7,00	0,00	660,00	625,00	0,30
2026	13:26:03.976	7,00	0,00	659,00	627,00	0,60
2027	13:26:04.229	6,00	0,00	659,00	625,00	0,60
2028	13:26:04.480	7,00	0,00	660,00	632,00	0,90
2029	13:26:04.731	7,00	0,00	657,00	625,00	1,20
2030	13:26:04.983	9,00	0,00	653,00	626,00	1,50
2031	13:26:05.234	10,00	0,00	649,00	631,00	1,80
2032	13:26:05.486	11,00	0,00	646,00	626,00	2,10
2033	13:26:05.737	11,00	0,00	642,00	624,00	2,50
2034	13:26:05.988	11,00	0,00	639,00	614,00	2,80

Прим. I_{KC} — ток контактной сети входной и выходной (с отрицательным значением), потребляемый/отдаваемый тяговым преобразователем, I_{PT} — ток через тормозной резистор, U_{KC} — напряжение контактной сети.

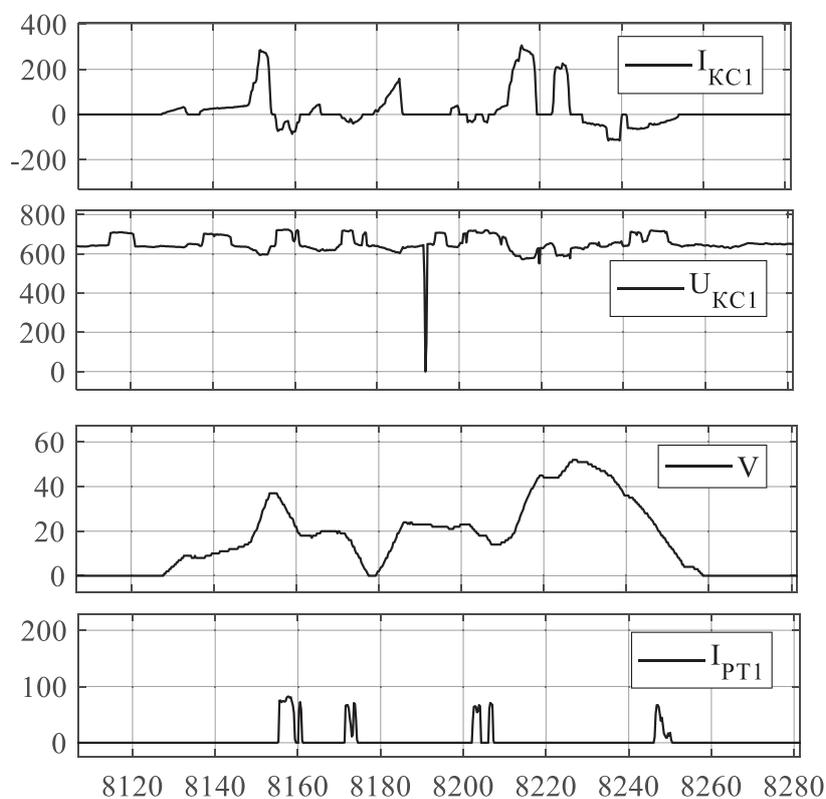


Рис. 1. Фрагмент графика измерений, зафиксированных тяговым преобразователем

В описанных условиях движения вагона объем полезной (выданной в КС на потребляющую нагрузку) энергии рекуперации составил 4,32 кВт·ч, или 32,3 % от потребленной на тягу энергии. Доля полезной рекуперации от полного объема рекуперированной энергии составила 63,6 % (почти две трети).

В описанных условиях движения вагона объем избыточной (рассеянной на тормозных резисторах) энергии рекуперации составил 2,47 кВт·ч, или 18,5 % от потребленной на тягу энергии. Доля избыточной рекуперации от полного объема рекуперированной энергии составила 36,4 % (чуть более трети).

Как уже было сказано выше, соотношение полезной и избыточной энергии рекуперативного торможения есть стохастическая величина и зависит от следующих факторов: погодные условия, которые определяют состав и мощность тяговой и нетяговой нагрузки в КС и сопротивление движению вагона, средняя маршрутная скорость движения вагона, манера вождения водителя транспортного средства, дорожная обстановка по ходу движения, электрическая ситуация в КС (наложение процессов потребления и рекуперации многих вагонов), установленные при наладке тяговых инверторов уставки отсечения энергии рекуперации на тормозные резисторы, типы и характеристики тяговых электродвигателей и некоторые др. Полученное соотношение полезной и избыточной рекуперации в межпиковое время может сильно отличаться от такового в пиковые периоды движения ЭПС. Также значительно изменяют это соотношение разные погодные условия. Например, летом объем избыточной рекуперации резко растет относительно этого значения в холодный период года, что обусловлено мощностью и длительностью нетяговой нагрузки [1].

Для выяснения зависимости полученных выше данных по рекуперации от погодных условий были взяты показатели, полученные аналогичным путем в ходе суточных измерений в зимний период. Дневная температура внешней среды была +1 °С, облачно, временами снег с дождем. Из всей совокупности архивных данных был выбран период, аналогичный по длительности в такое же межпиковое время движения. Принимались во внимание показания только одного тягового инвертора из двух.

За указанный период на тягу вагона было израсходовано 23,4 кВт·ч электроэнергии. При этом объем полезной рекуперации составил 11,67 кВт·ч, или 49,53 % от потребленной на тягу электроэнергии. Этот показатель практически полностью совпадает с «летним» соотношением полного объема энергии рекуперации к потреблению энергии на тягу (50,8 %). Объем избыточной энергии рекуперации составил 4,6 кВт·ч, или 19,64 % от потребления на тягу и 28,3 % от полного объема рекуперации. При температуре +1 °С в сравнении с летним измерением при +13 °С доля избыточной рекуперации в полном объеме рекуперации снизилась примерно на седьмую часть, а доля полезной — увеличилась примерно на одну десятую.

Отношение полного объема рекуперации к тяговому потреблению составило в указанный период измерений февраля 69,16 %.

Сравнение показателей измерения рекуперации летом и зимой позволяет заключить, что в холодное время года объем избыточной энергии рекуперации снижается. Причиной этого является значительное по времени наличие в контактной сети нетяговой нагрузки (салонные отопители, освещение и др.), которая имеет значимую с точки зрения рекуперации мощность и включена практически постоянно и которая потребляет вместе с периодически появляющейся в сети тяговой нагрузкой увеличенную долю энергии рекуперативного торможения по сравнению с летом.

Сравнение приведенных показателей рекуперации (табл. 2), с учетом внешних движению обстоятельств, дает нам следующие результаты. При снижении температуры воздуха на 12 °С увеличилась доля полного объема рекуперации (полезной и избыточной) от потребления энергии на тягу — с 50,8 до 69,16 % (более чем на треть). Этот факт, в частности, может означать следующее: при снижении температуры наружного воздуха резко снизились потери в тяговом приводе, в особенности при рекуперативных процессах. То есть уменьшились потери энергии в обмотках статоров тяговых электродвигателей, а также снизились потери при преобразованиях энергии в тяговом инверторе. А это означает, что выросла эффективность процессов рекуперации. Ведь отношение объемов рекуперации к объему потребления энергии на тягу есть фактически показатель КПД полного цикла тягового энергопотребления ЭПС за один цикл движения от трогания с остановки до следующей остановки (с учетом также механического сопротивления движению вагона).

На основании таблицы 2 построена диаграмма рисунка 2.

Еще одним источником данных об объемах полезной рекуперации служат показатели фидерных двунаправленных счетчиков энергии. Прямые перетоки энергии по фидерам показывают суммарное потребление каждого из них со сборной шины тяговой подстанции и рекуперативных перетоков, объем которых также учитывается и тяговыми инверторами. Перетекающая между фидерами рекуперация поступает по межпоездным перетокам с фидеров, на которых происходит рекуперативное торможение ПЕ, на потребляющую нагрузку на другие фидера.

ТАБЛИЦА 2. Соотношения различных видов энергии рекуперации и тягового энергопотребления в периоды измерений

	$\frac{E_{\text{РекПолезн}}}{E_{\text{Тяги}}}$	$\frac{E_{\text{РекИзбыт}}}{E_{\text{Тяги}}}$	$\frac{E_{\text{РекПолезн}}}{E_{\text{Рек}}}$	$\frac{E_{\text{РекИзбыт}}}{E_{\text{Рек}}}$	$T_{\text{Наруж}}, \text{ }^\circ\text{C}$
сен.20	0,323	0,185	0,636	0,364	+13
фев.19	0,495	0,196	0,716	0,284	+1

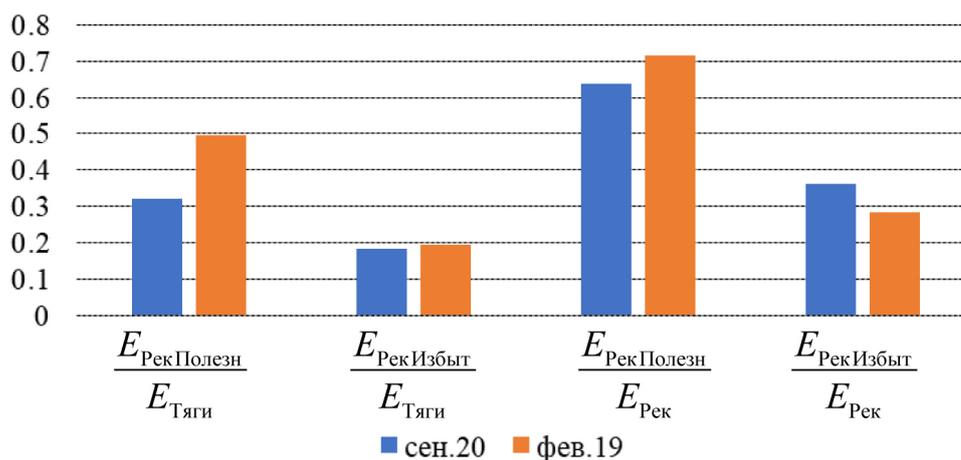


Рис. 2. Графики соотношений, приведенных в табл. 2

Учет рекуперативной энергии на борту подвижных единиц и сопоставление ее с параметрами их движения позволяет установить зависимости от других условий движения и тем самым наметить мероприятия, позволяющие снижать потребление энергии на выполнение транспортной работы, такие как оптимизация манеры вождения вагона, улучшение графика движения, внедрение буферных накопителей энергии и др., то есть уменьшить затраты предприятия ГЭТ на энергопотребление.

Выводы

Прямые инструментальные измерения расхода энергии на тягу вагонов и объемов полезной и избыточной рекуперации позволяют точно определить баланс энергии в контактной сети ГЭТ. Этот метод является наиболее информативным среди всех других способов таких измерений. Широкое распространение в настоящее время тяговых преобразователей на электрическом подвижном составе позволяет легко реализовать этот способ на предприятиях городского электротранспорта страны. Современные тяговые приводы позволяют обеспечить автоматический сбор такой информации в единую информационную сеть транспортного предприятия и в ближайшее время следует ожидать появления таких систем сбора данных с каждой единицы подвижного состава.

Объемы полезной и избыточной энергии рекуперации в значительной степени зависят от сезонных изменений мощности и продолжительности нетяговой нагрузки в КС и, следовательно, от погодных условий при выполнении транспортной работы. Данные об объемах полезной и избыточной рекуперации создают возможность для служб движения, подвижного состава и энергохозяйства транспортных предприятий вырабатывать мероприятия по экономии энергии.

Библиографический список

1. Кацай А. В., Бизяев А. А., Козаревич В. А. Сравнение параметров работы маховичного накопителя в контактной сети трамвая в холодные и теплые сезоны транспортной работы // Вестник МЭИ. 2022.
2. Шевлюгин М. В., Гречишников В. А. Эксплуатация накопителя энергии на метрополитене // Мир транспорта. 2013. № 5. С. 54–58.
3. Сацук Т. П., Шаряков В. А., Шарякова О. Л. и др. О применении тяговых аккумуляторных батарей на автономных подстанциях городского электротранспорта // Электротехника. 2021. № 10. С. 32–36.
4. Шаряков В. А., Шарякова О. Л., Агунов А. В. и др. Возможности рационального использования энергии торможения электрического подвижного состава // Электротехника. 2018. № 10. С. 55–59.
5. Идиятуллин Р. Г., Бакиров А. Р., Баженов Н. Г. Исследование законов распределения удельного расхода электроэнергии на тягу трамваев // Проблемы энергетики. 2005. № 7–8. С. 33–38.
6. Бакланов А. А., Незевак В. Л., Шатохин А. П. Классификация методов оценки эффективности рекуперативного торможения // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения: сборник научных трудов / Ростовский государственный университет путей сообщения. Ростов н/Д: РГУПС, 2016. № 1 (61). С. 26–33.

Дата поступления: 25.12.2023

Решение о публикации: 01.03.2024

Контактная информация

КАЦАЙ Александр Владимирович — канд. филос. наук, proton764@mail.ru

ШАРЯКОВ Владимир Анатольевич — канд. техн. наук, доцент, v_a_shar@mail.ru

ШАРЯКОВА Ольга Леонидовна — канд. техн. наук, доцент, o_l_shar@mail.ru

Determination of the volumes of useful and excess regenerative energy of the electric rolling stock of the urban electric transport

A. V. Katsay¹, V. A. Sharyakov², O. L. Sharyakova³

¹ ООО "Kinemak", 40, p. 3, Yuzhnoportovaya st., Moscow, 115088, Russia

² St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, 9, Moskovsky av., St. Petersburg, 190031, Russia

³ Higher School of Technology and Energy of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design (HSE SPbGUPTD), 4, Ivan Chernykh st., St. Petersburg, 198095, Russia

For citation: Katsay A. V., Sharyakov V. A., Sharyakova O. L. Determination of the volume of useful and excess regenerative energy of electric rolling stock of urban electric transport // Bulletin of scientific research results. St. Petersburg: PGUPS, 2024, iss. 1, pp. 74–83. DOI: 0.20295/2223-9987-2024-01-74-83

Abstract

Objective: consider the need to accurately determine the total amount of energy that a rolling stock generates during the conversion of mechanical braking energy into electrical energy. To show the need for the formation of measures to increase the volume of useful recovery. **Methods:** the use of well-known analytical expressions and the results of races obtained during the operation of electric rolling stock of urban electric transport on routes. **Results:** it is shown that the proposed method for determining the volumes of useful and excess regenerative energy allows us to accurately determine the energy balance in the contact network of urban electric transport. **Practical importance:** it is shown that the volumes of useful and excess energy recovery largely depend on seasonal changes in power and duration of non-traction load in the contact network and, consequently, on weather conditions during operation on the route. Data on the volumes of useful and excessive recovery create an opportunity for energy services of transport enterprises to develop energy saving measures.

Keywords: railway track, train-track interaction, dynamic wheel load on the rail, strength calculation of the railway track, equivalent track mass.

References

1. Katsay A. V., Bizjaev A. A., Kozarevich V. A. Sravnenie parametrov raboty mahovichnogo nakopitelja v kontaktojnij seti tramvaja v holodnyje i teplyje sezony transportnoj raboty // Vestnik MJeI. 2022. (In Russian)
2. Shevljugin M. V., Grechishnikov V. A. Jekspluatacija nakopitelja jenergii na metropolitene // Mir transporta. 2013. № 5. S. 54–58. (In Russian)
3. Sacuk T. P., Sharyakov V. A., Sharyakova O. L. i dr. O primenenii tjagovyh akumuljatornyh batarej na avtonomnyh podstancijah gorodskogo jelektrotransporta // Jelektrotehnika. 2021. № 10. S. 32–36. (In Russian)
4. Sharyakov V. A., Sharyakova O. L., Agunov A. V. i dr. Vozmozhnosti racional'nogo ispol'zovanija jenergii tormozhenija jelektricheskogo podvizhnogo sostava // Jelektrotehnika. 2018. № 10. S. 55–59. (In Russian)
5. Idijatullin R. G., Bakirov A. R., Bazhenov N. G. Issledovanie zakonov raspredelenija udel'nogo rashoda jelektrojenergii na tjagu tramvaev // Problemy jenergetiki. 2005. № 7–8. S. 33–38. (In Russian)
6. Baklanov A. A., Nezevak V. L., Shatohin A. P. Klassifikacija metodov ocenki jeffektivnosti rekuperativnogo tormozhenija // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija: sbornik nauchnyh trudov / Rostovskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija. Rostov n/D: RGUPS, 2016. № 1 (61). S. 26–33. (In Russian)

Received: December 25.12.2023

Accepted: December 01.03.2024

Author's information

Alexander V. KATSAY — PhD in Philosopher Sciences, proton764@mail.ru

Vladimir A. SHARYAKOV — PhD in Engineering, Associate Professor, v_a_shar@mail.ru

Olga L. SHARYAKOVA — PhD in Engineering, Associate Professor, o_l_shar@mail.ru